

付録3 地震動予測式のばらつき

1. はじめに

確率論的な地震動ハザード評価においては、用いる地震動予測式そのものの選定だけでなく、ばらつきの設定も重要である。近年の観測記録の蓄積にともないばらつきの分析に関する研究も進展しており、多数地点における様々な地震による観測記録から求められた地震動予測式の全体のばらつきから、地震間のばらつき（多数または特定地点における様々な地震によるばらつき）と地震内のばらつき（多数地点における1地震に対するばらつき）、特定地点における様々な地震に対するばらつき（single-station sigma または single-site sigma）や特定地点における特定地域の地震に対するばらつき（single-path sigma）などへの分離が行われつつある。ここでは、地震観測記録と地震動予測式に基づいた地震動（応答スペクトルを含む）のばらつきに関する近年の知見として、4.1節で提示した5つの文献について整理する。

- Morikawa et al. (2008)
- Lin et al. (2011)
- Rodriguez et al. (2011)
- 引田・友澤 (2013)
- Villani and Abrahamson (2015)

また、地震動予測式に関する動向として、近年注目されつつある、非エルゴード的な地震動予測モデルの考え方について補足する。

2. 地震動予測式のばらつきに関する近年の知見

2.1 Morikawa et al. (2008)

Morikawa et al. (2008) は震源領域ごとにデータを区分し、Kanno et al. (2006) の地震動予測式との残差に基づいて地震動のばらつきを検討している。6つの震源領域それぞれに対して、 M_w 5.5以上であり、防災科学技術研究所のK-NETあるいはKiK-net観測点において概ね同様の震源メカニズムの地震が5地震以上観測されたとしたデータが用いられている。データは合計50地震、7,753記録である。Morikawa et al. (2008) の検討結果によると、サイト補正後のばらつき（applied correction; total）はsingle-path sigmaに相当し、常用対数標準偏差で0.15~0.2程度であり、その地震間のばらつきは0.1~0.16程度、地震内のばらつきは0.1~0.14程度である。

2.2 Lin et al. (2011)

Lin et al. (2011) は台湾の観測記録を用いて、Chiou and Youngs (2008) の地震動予測式との残差に基づき、地震動のばらつきを検討している。Lin et al. (2011) が検討に用いたデータは、1993年12月~2003年6月までの64地震の観測記録である。Lin et al. (2011) の検討結果によると、single-site sigma (σ_{ss}) は自然対数標準偏差で0.58~0.67程度、single-path sigma (σ_{sp}) は自然対数標準偏

差で 0.34~0.46 程度である。Lin et al. (2011) による PGA に対するばらつきの値と既往研究のばらつきの値を比較すると、Lin et al. (2011) が算定したばらつきは既往研究のばらつきよりも概ね小さく、Morikawa et al. (2008) のばらつきと同程度かやや小さい値となっている。

2.3 Rodriguez et al. (2011)

Rodriguez et al. (2011) は日本国内の観測記録を用いて、Boore and Atkinson (2008) の地震動予測式を基本式とし、係数を新たに設定した上で、地震動のばらつきを検討している。Rodriguez et al. (2011) が検討に用いたデータは、2004 年 10 月までの KiK-net の地表記録と地中記録であり、 M_{JMA} が 4 以上の地震である。Rodriguez et al. (2011) の検討結果によると、single-station sigma は自然対数標準偏差で 0.6~0.7 の範囲である。Rodriguez et al. (2011) による PGA に対するばらつきの値と既往研究のばらつきの値を比較すると、Rodriguez et al. (2011) が算定したばらつきは、既往研究のばらつきに比べてやや大きい値となっている。また、Rodriguez et al. (2011) は、地震内のばらつきに対する地震規模依存性と距離依存性は明瞭には見られなかった、と述べている。

2.4 引田・友澤 (2013)

引田・友澤 (2013) は同一地点で観測されたマグニチュードと震源距離がそれぞれ等しい 2 地震の記録から地震動の応答スペクトルのばらつきを評価している。引田・友澤 (2013) が検討に用いたデータは、2009 年 12 月までに観測された K-NET 及び KiK-net の地表記録であり、検討対象地震は、震源メカニズムが同じとみなした 31 地震ペア、震源メカニズムが異なる 64 地震ペアの合計 95 地震ペアである。引田・友澤 (2013) の検討結果によると、single-path sigma に相当する、全体のばらつきは自然対数標準偏差で 0.35~0.45 程度、地震内のばらつきは 0.3~0.4 程度、地震間のばらつきは 0.2 程度である。この値は、Morikawa et al. (2008) と概ね同程度である。また、引田・友澤 (2013) によるばらつきの距離依存性の検討結果によると、地震間のばらつきには顕著な距離依存性が見られないが、地震内のばらつきには距離依存性が顕著に見られ、震源距離が小さいほどばらつきが大きくなっている。

2.5 Villani and Abrahamson (2015)

Villani and Abrahamson (2015) は、NGA-WEST2 の一つである Abrahamson et al. (2014) による南カリフォルニアの観測記録 (77 地震、1,776 記録) 及び CyberShake のシミュレーションデータ (約 415,000 シナリオ × 63 サイト) を用いて、周期 3 秒の加速度応答スペクトルのばらつきについて検討している。Villani and Abrahamson (2015) の検討結果によると、加速度応答スペクトル (周期 3 秒、減衰定数 5%) のばらつきの値として、観測記録の全体のばらつき、single-site sigma、及び single-path sigma はそれぞれ自然対数標準偏差で 0.707、0.594、0.242 であり、Lin et al. (2011) によるばらつきよりもやや小さい値となっている。一方、シミュレーションデータに関して、全体のばらつきは観測記録とほぼ同じ (0.71) であるものの、伝播経路特性に関連するばらつきが観測記録よりも大きくなっている。

2.6. まとめと今後の課題

地震動予測式のばらつきに関する近年の研究は、地震間のばらつきと地震内のばらつきへの分離だけでなく、特定地点あるいは特定地震（震源域）のばらつきの評価が行われている。その結果、おおよそのばらつきの値（自然対数標準偏差）として、

- 全体のばらつき： 0.7～0.9
- 地震間のばらつき： 0.4～0.5
- 地震内のばらつき： 0.5～0.6
- single-station sigma: 0.6～0.7
- single-path sigma: 0.25～0.45

が示されている。確率論的な地震ハザード解析では、対象地点において震源断層が特定された1つの地震に対するハザード評価をする場合、震源と対象地点が固定されることから、本来ならば本質的なばらつきとしては、震源特性によるばらつきが支配的であり、震源から対象地点までの伝播経路特性と対象地点のサイト特性によるばらつきは小さいと考えられる（地震調査委員会、2004）。すなわち、様々な地震による多数地点の観測記録から求められた地震動予測式のばらつきの値をエルゴード的な仮定のもとで用いることは適切ではなく、大き目のばらつきとなっている（例えば、Anderson and Brune, 1999）。確率論的地震動予測地図ではサイト特性に起因するばらつきを除去した single-station sigma に相当する値として自然対数標準偏差で 0.35～0.53（常用対数標準偏差で 0.15～0.23）を採用し、今回の応答スペクトルに関する地震動ハザード評価でも用いた。ただし、この値は特定の震源域における地震による観測記録の分析結果（奥村・他、2004）も踏まえており、single-path sigma に近いとも考えられる。

特定地点における特定地震を対象とする確率論的地震動ハザード評価においては本来 single-path sigma を用いるべきであるが、これはあくまで特定地震を対象とした非エルゴード的な地震動予測式を用いて平均値を求めることが前提条件となる。近年蓄積される強震動記録は飛躍的に増大しており、その記録を用いることで伝播経路特性も詳細にモデル化する非エルゴード的な地震動予測式の構築とそれによる地震ハザード評価の試みが行われつつある（例えば、Abrahamson et al., 2019）。日本では K-NET、KiK-net や震度情報ネットワークをはじめとした高密度な観測網による膨大な記録の蓄積が続いており、非エルゴード的な地震動予測モデルの構築により、ばらつきの地震規模（マグニチュード）や震源距離、振幅、周期依存性もあわせて明らかになることが今後期待される。一方で、確率論的地震動予測地図及び今回の応答スペクトルを対象とした評価では無限大の地震動が生じないように対数正規分布の裾を $\pm 3\sigma$ で打ち切ることも採用しているが、大振幅域に関してはばらつきの値だけでなく分布形状そのものの検討も重要である（例えば、Si et al., 2019）。

【参考文献】

- Abrahamson, N. A., N. M. Kuehn, M. Walling, N. Landwehr (2019): Probabilistic Seismic Hazard Analysis in California Using Nonergodic Ground - Motion Models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.109, No.4, pp.1235-1249. <https://doi.org/10.1785/0120190030>
- Abrahamson, N. A., W. Silva, and R. Kamai (2014): Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions, *Earthquake Spectra*, Vol.30, No.3, pp.1025–1055. <https://doi.org/10.1193/070913EQS198M>
- Anderson, J. G., and J. N. Brune (1999): Probabilistic Seismic Hazard Analysis without the Ergodic Assumption, *Seismological Research Letters*, Vol.70, No.1, pp.19-28. <https://doi.org/10.1785/gssrl.70.1.19>
- Boore, D. M., and G. M. Atkinson (2008): Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods Between 0.01 s and 10.0 s, *Earthquake Spectra*, Vol.24, No.1, pp.99–138. <https://doi.org/10.1193/1.2830434>
- 防災科学技術研究所 (2019) : 防災科研 K-NET, KiK-net. <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>
- Chiou, B. and R. R. Youngs (2008): An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra, *Earthquake Spectra*, Vol.24, No.1, pp.173–215. <https://doi.org/10.1193/1.2894832>
- 引田智樹・友澤裕介 (2013) : 地震規模と震源距離が同じ 2 地震による同一地点の観測記録に基づく応答スペクトル振幅のばらつき、*日本建築学会構造系論文集*、第 78 巻、第 686 号、pp.723-732.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2004) : 確率論的地震動予測地図の試作版 (地域限定－西日本) 説明文.
- Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima (2006): A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.96, No.3, pp.879-897. <https://doi.org/10.1785/0120050138>
- Lin, P. S., B. Chiou, N. Abrahamson, M. Walling, C. T. Lee, and C. T. Cheng (2011): Repeatable Source, Site, and Path Effects on the Standard Deviation for Empirical Ground-Motion Prediction Models, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.101, No.5, pp.2281-2295. <https://doi.org/10.1785/0120090312>
- Morikawa, N., T. Kanno, A. Narita, H. Fujiwara, T. Okumura, Y. Fukushima, and A. Guerpinar (2008): Strong motion uncertainty determined from observed records by dense network in Japan, *Journal of Seismology*, Vol.12, No.4, pp.529-546. <https://doi.org/10.1007/s10950-008-9106-2>
- 奥村俊彦・渡辺基史・藤原広行 (2004) : 2003 年十勝沖地震の本震・余震記録に基づく最大速度のばらつきの検討、*日本地震学会 2004 年秋季大会講演予稿集*、B26.
- Rodriguez-Mark, A., G. A. Montalva, F. Cotton, and F. Bonilla (2011): Analysis of Single-Station Standard Deviation Using the KiK-net Data, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.101, No.3, pp.1242-1258. <https://doi.org/10.1785/0120100252>
- Si, H., H. Fujiwara, and M. Nakajima (2019): VARIATION OF DENSITY FUNCTIONS FOR THE DISTRIBUTION OF RESIDUALS BETWEEN GMPE AND OBSERVATION DATA BASED ON

THE NGA-W2 DATABASE, 25th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology.

Villani, M. and N. A. Abrahamson (2015): Repeatable Site and Path Effects on the Ground-Motion Sigma Based on Empirical Data from Southern California and Simulated Waveforms from the Cybershake Platform, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.105, No.5, pp.2681-2695. <https://doi.org/10.1785/0120140359>